

# 채널화 방식을 이용한 저피탐 도약신호 감지 성능에 관한 연구

고민호\* · 서유석\* · 김형주\* · 나선필\*\*

## A Study on the Detection Performance of the LPI Hopping Signal using a Channelization Method

Min-Ho Go\* · Yoo-Seok Seo\* · Hyoung-Joo Kim\* · Sun-Phil Nah\*\*

### 요약

본 논문은 짧은 감지 시간과 높은 시간 해상도 특성을 갖는 협대역 채널화 라디오미터의 성능을 이론 수식을 이용하여 검증하였다. 모의실험 결과, 채널화 라디오미터는 광대역 라디오미터에 비해 2.5 dB 우수한 감지 성능을 나타내었지만 잡음 영향에 민감한 특성을 갖는다는 것을 확인하였다. 또한 협대역 라디오미터의 신호 대잡음비는 도약율과 지터 특성 급격한 특성 변화를 갖으며, 두 파라미터에 의해 선형적인 성능 저하를 나타내었다.

### ABSTRACT

In this paper, the performance of the narrowband channelized radiometer that have a short detection time and high time-resolution was verified based on the theoretical formula. According to the simulation result, the channelized radiometer showed 2.5 dB superior detection performance compared to the broadband radiometer, but is more sensitive to the effects of noise than the broadband radiometer. Also the signal-to-noise of a channelized radiometer was changed dramatically according to the hop rate and jitter effect, which is linearly decreased as the change of two parameters.

### 키워드

COMINT, Low Probability of Intercept, Hopping Signal, Radiometer, Channelization  
COMINT, 저피탐, 도약신호, 라디오미터, 채널화

### 1. 서론

주파수 도약(Frequency Hopping:FH) 시스템은 열악한 광대역 무선 채널 조건에서 주파수 다이버시티를 이용하여 고신뢰성의 통신을 제공함과 동시에 고의적인 전파교란(Jamming) 환경 하에서 우수한 항재밍

(Anti-Jamming) 성능을 제공하는 장점으로 인해 저피탐(Low Probability of Intercept: LPI) 및 보안이 요구되는 군용 통신에 널리 적용되고 있다.

주파수 도약 시스템은 정보 전송을 위해 단일 고정 반송파를 사용하는 대신에 복수의 주파수로 광대역에서 불규칙적으로 도약하며 하나의 주파수에 잔류하는

\* 삼성탈레스 ISR · PGM연구소(minho0423.go@samsung.com)

\*\* 교신저자(corresponding author) : 국방과학연구소(spnah@add.re.kr)

접수일자 : 2014. 04. 11

심사(수정)일자 : 2014. 05. 23

게재확정일자 : 2014. 06. 16

시간이 짧기 때문에 도약신호 감지 및 분석을 위해서 높은 기술적 접근이 요구된다[1-2]. 주파수 도약신호를 감지하기 위한 대표적인 방식으로 라디오미터(Radiometer), 주기정상성특성(Cyclo-stationary feature) 및 자기상관성 특성(Auto-correlation feature)을 이용하는 방식이 있다. 자기상관함수 방식은 시간 영역에서 중첩과 상관을 구해야 하므로 많은 연산이 필요하여 감지 시간이 길다는 단점을 갖는다[3]. 주기정상성 방식은 주파수 영역에서 상관함수를 이용하여 검출하는 방식으로 복잡한 검지회로가 요구된다[4]. 라디오미터 방식은 대역통과필터를 통과한 신호의 크기값과 설정된 기준값을 비교하여 신호 유무를 판별하는 방식으로 감지 시간이 짧지만 넓은 대역폭으로 신호대 잡음비(SNR) 특성이 저하되는 단점을 갖는다[5].

라디오미터 방식의 SNR 성능 저하는 넓은 아날로그 대역통과필터를 통과한 신호에 대해 신호 존재 유무를 판단하기 때문으로 최근에는 아날로그 대역통과필터 대신에 협대역 채널화 디지털 필터를 적용하여 신호 대역폭에 근사한 필터 대역폭 구현으로 시간 해상도와 주파수 해상도를 개선하는 연구가 진행되고 있다[6].

본 논문에서는 시간 해상도 특성이 우수한 라디오미터 방식의 SNR 특성을 개선하기 위해 제안되고 있는 협대역 채널화 구조의 감지성능 특성을 이론적 수식 및 모델링을 통하여 검증하였다.

본 논문의 구성은 2장에서 협대역 채널화 라디오미터 방식의 이론에 대해 논하였고 3장에서는 모델링과 검증 결과에 대해서 설명하였고 마지막으로 연구 결과를 정리하였다.

## II. 협대역 채널화 라디오미터 이론

광대역 라디오미터는 블라인드(blind) 신호 감지에 유용한 방식이지만 넓은 대역폭에 의한 잡음 영향으로 상대적으로 낮은 감지 성능을 갖는다[7-8]. 협대역 채널화 구조는 전체 채널 대역폭을 다수의 협대역 채널로 분할하여 각 채널별로 신호 유무를 판단하는 방식으로 SNR 개선으로 감지 성능을 개선시킬 수 있으며 각 채널별 감지 시간-적분시간-조절을 통하여 시간과 주파수 영역에서 신호감지가 가능하다. 또한 생성된

시간-주파수의 2차원 데이터를 이용하여 다양한 신호 분석 기법을 적용하여 채널간 신호 특성들을 비교/분석하여 유연한 신호분석이 가능한 장점을 갖는다.

그림 1은 협대역 채널화 라디오미터 구성도를 나타내었다. 수신신호  $x(t)$ 는 협대역 대역폭  $BW_{Ni}$ 을 갖는  $M$ 개의 대역통과필터로 분할되며 각 출력들은 제곱 및 적분주기( $T$ ) 동안 적분되어 각 채널별로 임계값( $Z_T$ ) 비교를 통하여 신호 유무를 판별한다. 만약  $M$  채널에서 최소 한 개 신호 감지가 판별되면 논리 1값이 특정 도약주기 동안 저장되며 신호 도약주기를 고려하기 위해  $N$ 번 반복된 후 도약주기 당 감지의 누적값( $K$ )가 특정 값으로 설정된 2차 임계값( $Z_K$ )과 비교된다. 실험적으로  $Z_K = 0.6N$ 으로 설정했을 경우 최적 성능을 나타낸다[9].

채널화 라디오미터는 각 채널의 임계값( $Z_T$ )과 각 채널에서 감지되는 신호의 누적 개수에 따른 임계값( $Z_K$ )을 적용하는 이중 임계값 방식을 적용한다.

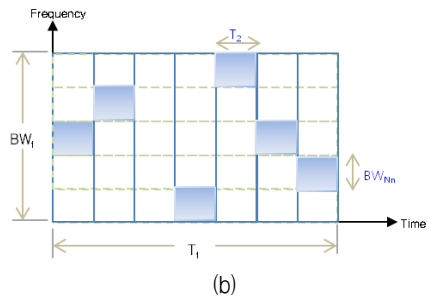
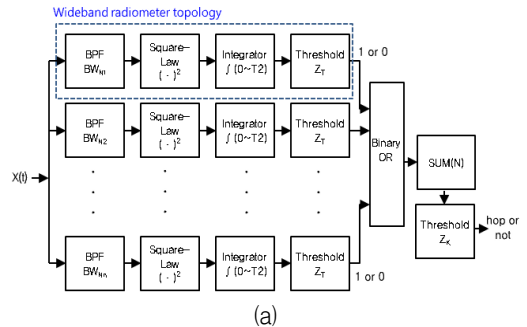


그림 1. (a) 협대역 채널화 라디오미터 구조, (b) 시간-주파수 분포

Fig. 1 (a) Narrowband channelization radiometer topology, (b) Time-frequency space

모든  $M$  채널에서 오경보(false alarm)가 발생하지 않을 확률은 각 채널의 오경보 확률의 곱으로 나타낼 수 있으므로 채널 간 독립적인 특성을 갖는 잡음만 존재할 경우, 바이너리 OR-게이트 출력에서 논리 1을 갖는 확률은 식(1)로 표현할 수 있다.  $Q_F$ 는 각 채널별의 오경보율을 의미한다.

$$P_o = 1 - (1 - Q_F)^M \quad (1)$$

식 (1)의 경우가  $N$ 번 반복에서  $i$ 번 발생할 확률은 이항분포(binomial)계수로 나타낼 수 있으므로 전체 오경보률( $P_{FA}$ )은 식 (2)처럼 임계값( $Z_K$ )을 초과하는 모든 확률의 합으로 표현할 수 있다.

$$P_{FA} = \sum_{i=Z_K}^N \binom{N}{i} P_o^i (1 - P_o)^{N-i} \quad (2)$$

신호와 잡음이 존재하는 경우, OR-게이트 출력에서 논리 1이 발생할 수 있는 경우는 식 (3)처럼 신호 감지에 의한 확률 또는 잡음에 의한 오경보가 발생할 확률로 나타낼 수 있다.  $Q_D$ 는 각 채널별로 신호감지 확률을 나타낸다.

$$P_1 = 1 - (1 - Q_D)(1 - Q_F)^{M-1} \quad (3)$$

그러므로 잡음만 존재하는 식 (2)와 유사하게 전체 감지확률  $P_D$ 는 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$P_D = \sum_{i=Z_K}^N \binom{N}{i} P_1^i (1 - P_1)^{N-i} \quad (4)$$

만약 시스템 설계 파라미터로  $P_{FA}$ 와  $P_D$ 가 주어진다면, 식 (1)과 식 (3)을 이용하여  $P_o$ 과  $P_1$ 을 구할 수 있으며 각 채널에서의  $Q_F$ 와  $Q_D$ 값은 식 (5)와 식 (6)과 같이 유도할 수 있으며 식 (7)과 식 (8)을 이용하여 SNR을 계산할 수 있다.

$$Q_F = 1 - (1 - P_o)^{1/M} \quad (5)$$

$$Q_F = 1 - \frac{1 - P_1}{(1 - Q_F)^{M-1}} \quad (6)$$

본 논문에서는 시간-대역폭곱( $T \cdot W$ )에 따라 SNR을 비교적 용이하게 계산할 수 있는 Edell 모델과 Engler 모델을 이용하여 채널화 성능 모의실험을 수행하였다[10]. 시간-대역폭의 값이 큰 경우( $T \cdot W > 1000$ ) 식 (7)에 나타낸 Edell 모델을 적용하여 계산하며, 시간-대역폭이 적은 경우에는 식 (8)에 나타낸 Engler 모델을 이용하여 SNR을 계산하였다.

$$SNR_{req} = d \sqrt{\frac{W}{T}} \quad (7)$$

$$SNR_{req} = \frac{(X_0 + \sqrt{X_0^2 + 16 T W X_0})}{4 T} \quad (8)$$

여기서,  $d = Q^{-1}(P_{FA}) - Q^{-1}(P_D)$ ,  $X_0 = d^2$ 을 의미한다. Edell 모델의 경우,  $T \cdot W > 1000$ 인 경우 0.3 dB 오차 내외,  $T \cdot W = \infty$ 인 경우 0 dB 오차로 SNR을 예측할 수 있으며, Engler 모델의 경우  $T \cdot W < 100$ 인 경우 0.5 dB 오차 내외에서 예측 가능하다[11].

### III. 채널화 라디오미터 성능 모의실험

채널화 구조의 라디오미터 성능 모의실험은 MATLAB을 이용하였고 설계 파라미터 및 계산 절차를 표 1과 그림 2에 나타내었다.

표 1. 모의실험 파라미터  
Table 1. Simulation parameter

Design Parameter	Symbol	Value
False Alarm	$P_{FA}$	$10^{-3}$
Channel Bandwidth	BW	60 (Hz)
Channel Number	M	BW/BW <sub>Nn</sub>
Channel Spacing	BW <sub>Nn</sub>	2 (Hz),
Hop rate	$T_1$	20 (sec),

그림 3은 광대역 라디오미터 감지성능과 채널화 라디오미터 감지성능 모의실험 결과를 나타내었다. 모의실험 결과처럼 90% 감지성능을 위해 광대역 구조는 4.5 dB SNR 특성을 나타내며 채널화 구조는 2.0 dB SNR 특성을 요구한다. 채널화 구조가 2.5 dB 우수한

감지 성능을 나타내고 있음을 예측할 수 있다. 그러나 그림 3(b)처럼 채널화 구조는 곡선 변화가 급격하게 변하는 것을 알 수 있으며 이는 잡음 등의 영향에 더 민감하게 성능이 변한다는 것을 의미한다.

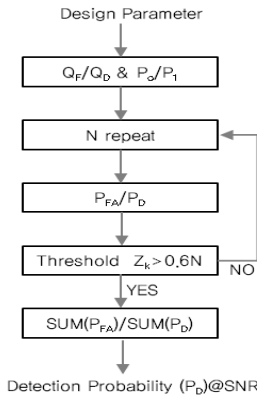
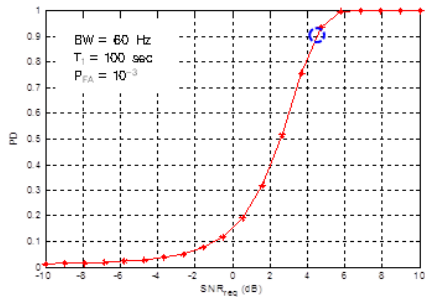
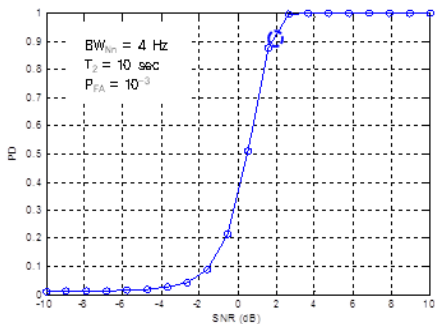


그림 2. 채널화 성능 모의실험 흐름도  
Fig. 2 Performance simulation flow chart



(a)



(b)

그림 3. 감지성능 비교 (a) 광대역, (b) 채널화  
Fig. 3 Detection performance (a) wideband, (b) channelization(narrowband)

그림 4는 채널 대역폭(BW<sub>Nb</sub>)에 따른 채널화 라디오미터의 감지 성능을 나타낸 것으로 채널 대역폭이 좁아질수록 감지성능 90 % 충족하기 위해 요구되는 SNR도 감소한다. 이러한 성능 변화는 채널대역폭의 감소에 따라 단위 채널로 유입되는 잡음 성분의 저감으로 SNR 특성이 개선되는 것으로 판단된다. 또한 채널 대역폭이 특정 임계값 이하로 감소할 경우 SNR 개선에 큰 변화가 없음을 알 수 있다.

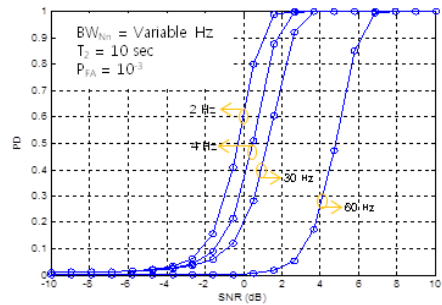


그림 4. 채널 대역폭에 따른 감지성능  
Fig. 4 Detection performance with respect to channel bandwidth

그림 5는 도약 신호 도약율에 따른 채널화 라디오미터의 감지 성능을 나타낸 것으로 도약율(T<sub>2</sub>)의 증가에 따라 감지 성능 90%를 충족하기 위해 요구되는 SNR 특성이 증가함을 알 수 있다. 도약신호의 도약 속도가 증가함에 따라 각 채널에서의 적분시간의 감소로 신호 세기가 감소하기 때문으로 사료된다. 또한 그림 3의 채널대역폭 변화에 따른 감지성능 변화와 비교했을 때 도약율의 증감에 따라 SNR 특성이 급격하게 변하는 것을 알 수 있다.

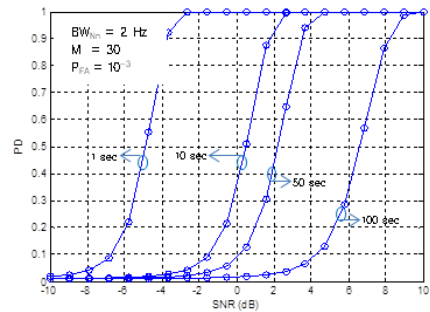


그림 5. 도약율에 따른 감지성능  
Fig. 5 Detection performance with respect to hop rate

지터는 전송 채널에 의한 영향, 수신기 내부의 위상 잡음 및 클럭 지터, 송신기 내부의 주파수 천이 등에 발생할 수 있다. 본 논문에서는 도약주기( $T_2$ )내에 존재하는 신호 체류시간으로 지터 특성을 모델링하여 성능 모의실험을 하였다.

그림 6은 지터에 따른 채널화 라디오미터의 감지 성능을 나타낸 것으로 지터 증가에 따라 각 채널별로 도약주기( $T_2$ )내에 존재하는 체류 시간이 감소하기 때문에 지터 성분 증가에 따라 감지 성능이 저하된다. 또한 지터 증감 변화에 따라 급격한 SNR 특성 변화를 나타내고 있음을 알 수 있다.

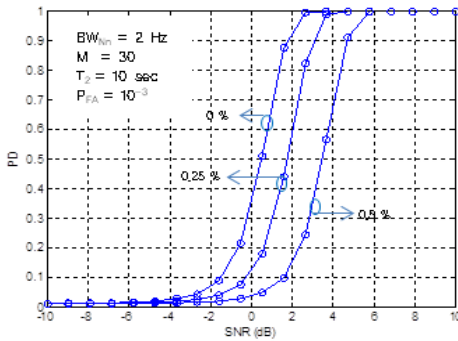


그림 6. 지터에 따른 감지 성능  
Fig. 6 Detection performance with respect to Jitter

#### IV. 결론

본 논문에서는 저피탐 특성을 갖는 도약신호 감지를 위한 채널화 라디오미터의 감지 성능에 관한 것으로 광대역 구조와의 성능비교, 채널 대역폭 및 도약율 변화에 대한 채널화 구조의 성능 변화를 고찰하였다.

모의실험에 따르면 채널화 라디오미터는 광대역 구조에 비해 잡음 등의 영향에 민감한 성능 변화를 나타내었고, 특히 도약율 및 지터 특성이 성능에 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다. 이는 도약신호 감지 및 분석을 위해 채널화 방식을 적용한 경우 각 채널별 적분 구간 제어 및 동기화 방식에 세심한 설계가 선행되어야함을 의미한다.

본 논문은 협대역 라디오미터 이론을 이용하여 채널화 성능을 모의실험 하였지만 특정 변조 데이터를 포함한 도약신호를 생성하여 채널 특성에 의한 채널화

성능 및 재밍신호에 대한 영향에 관한연구를 추가로 진행해야 할 것으로 사료된다.

#### References

- [1] J. Joo, J. Won, C. Lee, and S. Park, "Frequency Hopping Signal Extraction Technique Using Histogram Analysis in Multiple Signal Environments," In *Proc. The Korean Institute of Communications and Information Sciences*, vol. 6 no. 7, 2006.
- [2] W.-Y. Jeong and S.-K. Lee, "A Study on the Self-Key Generation Algorithm for Security Elevation in Near Field Communications," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 7, no. 5, 2012, pp. 1027-1032.
- [3] A. Polydoros, "LPI Detection of Frequency-Hopping Signals Using Autocorrelation Techniques," *IEEE Trans. Communications*, vol. 3, no. 5, 1985, pp. 1-13.
- [4] Y. Kim, "Wavelet Transform Coding for Image Communication," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences* vol. 6, no. 1, 2011, pp. 61-67.
- [5] R. A. Dillard and G. M. Dillard, *Detectability of Spread-Spectrum Signals*. Dedham MA : Artech House, 1989.
- [6] F. Ahmed and S. A. Khan, "A Framework for Computationally Efficient Detection of Frequency Hopped Signals in Non-cooperative Environment," *IEEE Conf. software, Telecommunications and Computer Networks*, Sept. 2008, pp. 248-252.
- [7] L. K. Nguyen, M. A. Blanco, and L. J. Sparace, "On the Sensitivity of Wideband Radiometric Detection for Low Probability of Intercept and Probability of Detection (LPI/LPD) in Frequency Hopped Systems," *IEEE Military Communications Conf.*, San Diego, CA, Nov. 2013, pp. 817-822.

- [8] M.-H. Go, "Design and Fabrication of wideband low-noise amplification stage for COMINT," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences* vol. 7, no. 2, 2012, pp. 221-226.
- [9] R. F. Mills and G. E. Prescott, "A Comparison of Various Radiometer Detection Models," *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, vol. 32, no. 1, 1996, pp. 467-473.
- [10] J. J. Lehtomäki, "Maximun Based Detection of Slow Frequency Hopping Signals," *IEEE Communication Letters*, vol. 7, no. 5, 2003, pp. 201-203.
- [11] R. F. Mills and G. E. Prescott, "A Comparison of Various Radiometer Detection Models," *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, vol. 32, no. 1, Jan. 1996, pp. 467-473.

저자 소개

**고민호(Min-Ho Go)**



2009년 2월 인하대학교 전자공학과 (공학박사)  
 2010년 2월 차세대항공 전자통신 인력양성사업단 연구원

2010년 7월~현재 삼성탈레스 ISR·PGM 연구소 전문연구원

※ 관심분야 : 광대역 송수신 시스템, MMIC/RFIC 및 디지털 신호처리

**서유석(Yoo-Seok Seo)**



2002년 2월 국민대학교 전자공학과 졸업(공학사)

2008년~현재 삼성탈레스 전문연구원

※ 관심분야 : 방향탐지 및 전자전 디지털 신호처리 등

**김형주(Hyoung-Joo Kim)**



1989년 2월 광운대학교 전자통신공학과 (공학사)

1992년 2월 성균관대학교 전자공학과 (공학석사)

1989년 3월~1998년 2월 삼성전자 연구원

1998년 3월~2006년 2월 Radionix 이사

2006년 3월~2008년 2월 M&M Lynx 연구원

2009년 3월~현재: 삼성탈레스 수석연구원

※ 관심분야 : 안테나, 초고주파회로, 레이더 시스템 등

**나선필(Sun-Phil Nah)**



1985년 2월: 충남대학교 계산통계학과(공학사)

1987년 8월: 충남대학교 계산통계학과(공학석사)

2012년 현재 국방과학연구소 재직

※ 관심분야 : 신호감시, 신호처리